

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-085314
(43)Date of publication of application : 30.03.2001

(51)Int.Cl. H01L 21/027
G03F 7/20

(21)Application number : 11-259622
(22)Date of filing : 13.09.1999

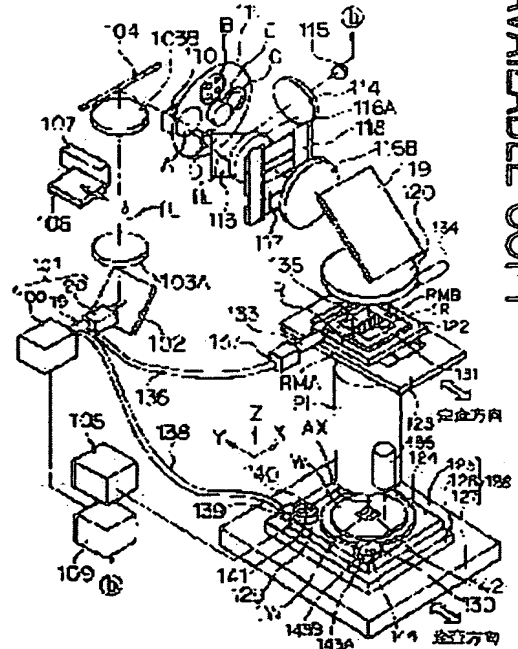
(71)Applicant : NIKON CORP
(72)Inventor : NISHI TAKECHIKA

(54) EXPOSURE METHOD AND ALIGNER FOR EXPOSURE AND METHOD FOR MANUFACTURING DEVICE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To improve imaging formation characteristic measurement accuracy by using a light source, which is small in size and easy to maintain.

SOLUTION: A pulse beam which is obtained by amplifying a laser beam, whose wavelength is within a region from a visible region to an infrared region and which is emitted from, for instance, a DFB(distributed feedback) laser, etc., with an optical fiber amplifier in the fundamental wave generating unit 100 of an illuminating light source 101 is supplied to a wavelength conversion unit 20 via an optical fiber bundle 19 and converted into an ultraviolet illuminating light IL. When an illuminating light supplied through an optical fiber bundle 138, branched from output end of the optical fiber bundle 19 and an illuminating light generated by a wavelength conversion unit 139 are applied to an aperture 140 to measure the best-focused position of a projection optical system PL, the detection signal obtained by the measurement is normalized by integrated energy which is obtained by detecting the ultraviolet illuminating light by plurality of pulses.



BEST AVAILABLE COPY

LEGAL STATUS

[Date of request for examination]
[Date of sending the examiner's decision of rejection]
[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]
[Date of final disposal for application]
[Patent number]
[Date of registration]
[Number of appeal against examiner's decision of rejection]
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]
[Date of extinction of right]

(18) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-85314

(P2001-85314A)

(49) 公開日 平成13年3月30日(2001.3.30)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	9-7E-1*(参考)
H01L 21/027		H01L 21/30	515D 5F046
G03F 7/20	521	G03F 7/20	521
		H01L 21/30	516C

審査請求 未請求 請求項の数14 OL (全22頁)

(21) 出願番号 特願平11-259822

(22) 出願日 平成11年9月13日(1999.9.13)

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内8丁目2番3号

(72) 発明者 西 健爾

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(74) 代理人 100088165

弁理士 大森 勉

Fターム(参考) B6046 B405 CA03 CA08 CB01 CB04

CB15 CB22 CB23 DA01 DB01

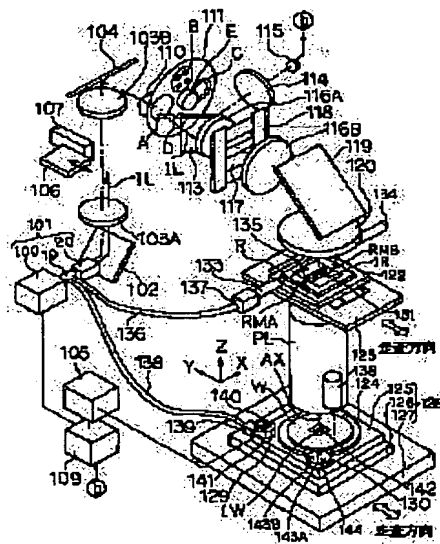
DC01

(54) 【発明の名称】 露光方法及び装置、デバイスの製造方法及び露光装置の製造方法

(57) 【要約】

【課題】 小型化でメンテナンスが容易である光源を使用し、結像特性計測精度を向上する。

【解決手段】 露光光源100中の基本波発生部100-1において、例えばD.F.B. (Distributed feedback) レーザ等からの可視域から赤外域のレーザ光を光ファイバー増幅器を用いて増幅して得られたパルス光を、光ファイバーバンドル109を介して波長変換部200に供給し、ここで紫外の露光光101に変換する。その光ファイバーバンドル109の出力端を分岐した光ファイバーバンドル103B、及び波長変換部103Aから発生する照明光を開口104に照射して、投影光学系PLのベストフォーカス位置を計測する際に、露光光101を複数パルスずつ検出して得られる検算エネルギーによって、その計測の際に得られる検出信号を規格化する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 評価用マークを照明光で照明し、前記評価用マークの像を投影光学系を介して投影し、前記評価用マークの像と光電検出器とを相対走査させながら前記評価用マークの像の状態を検出し、該検出結果に基づいて露光を行う露光方法において、
光ファイバー増幅器によって増幅されたパルスレーザー光を波長変換して得られたパルス紫外光を前記照明光として使用し、

前記評価用マークの像を前記光電検出器によって検出する際に、照明光としての前記パルス紫外光の強度を複数パルス毎、又は所定の時間間隔毎に計測し、
該計測結果に基づいて前記光電検出器の検出信号を規格化することを特徴とする露光方法、

【請求項2】 前記パルス紫外光の発光周波数は10kHz以上で1MHz以下であることを特徴とする請求項1に記載の露光方法、

【請求項3】 第1物体を照明光で照明し、前記第1物体のパターンを経た照明光で第2物体を露光する露光方法において、

第1の紫外光をパルス発光する第1の光源装置と、
光ファイバー増幅器で増幅したレーザー光を波長変換することによって前記第1の紫外光と実質的に同じ波長域の第2の紫外光を発光できる移動自在な第2の光源装置とを備え、

前記第2物体の露光時に前記第1の光源装置からの紫外光を用い、

前記第1物体の照明系の調整時に前記第2の光源装置からの紫外光を用いることを特徴とする露光方法、

【請求項4】 照明光で第1物体を照明し、前記第1物体のパターンを経た照明光で投影光学系を介して第2物体を露光する露光方法において、

可視域から赤外域までの波長域内で発振波長が可変のレーザー光を光ファイバー増幅器によって増幅し、該増幅後のレーザー光を波長変換して得られた紫外光を前記照明光とし、

前記投影光学系の結像特性の変動量を予測又は計測し、
該予測又は計測される結像特性の変動量を相殺するように前記発振波長が可変のレーザー光の波長を変化させて、
前記紫外光の波長を制御することを特徴とする露光方法、

【請求項5】 前記結像特性の変動量は、前記投影光学系のディストーション、倍率誤差、又はデフォーカス量であることを特徴とする請求項4に記載の露光方法、

【請求項6】 照明光で第1物体を照明し、前記第1物体のパターンを経た照明光で第2物体を露光する露光方法において、

単一のレーザー光を複数に分岐してそれぞれ光ファイバー増幅器を有する複数の光増幅部で増幅し、該増幅後の複数のレーザー光を束ねて波長変換して得られた紫外光を前

記照明光とし、

前記複数の光増幅部のそれぞれの出力を検出し、該検出結果より前記複数の光増幅部の内の所定の光増幅部が寿命に達したと判定された場合に、

前記所定の光増幅部を別の光増幅部と交換することを特徴とする露光方法、

【請求項7】 照明光で第1物体を照明し、前記第1物体のパターンを経た照明光で第2物体を露光する露光方法において、

光ファイバー増幅器によって増幅されたレーザー光を波長変換して得られた紫外光を前記照明光とし、

前記波長変換後の前記照明光の第1の強度、及び前記第2物体に至るまでの光路上での前記照明光の第2の強度を継続して計測し、

該計測結果に基づいて透過率が変動している光学部材の位置を特定することを特徴とする露光方法、

【請求項8】 第1物体を照明光で照明し、前記第1物体のパターンを経た照明光で第2物体を露光する露光装置において、

赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザー光を発生するレーザー光発生部と、

該レーザー光発生部から発生されたレーザー光を増幅する光ファイバー増幅器を有する光増幅部と、

該光増幅部によって増幅されたレーザー光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部とを備えた光源装置と、

該光源装置からの前記照明光としてのパルス紫外光の強度を前記第2物体までの光路上で複数パルス毎、又は所定の時間間隔毎に計測するモニタ系と、

評価用マークの像を検出するマーク検出系と、

前記モニタ系の計測値に基づいて前記マーク検出系の検出信号を規格化する演算制御系とを有することを特徴とする露光装置、

【請求項9】 第1物体を照明光で照明し、前記第1物体のパターンを経た照明光で第2物体を露光する露光装置において、

第1の紫外光をパルス発光する第1の光源装置と、

前記第1の紫外光と実質的に同じ波長域の第2の紫外光を前記第1の光源装置よりも高いパルス周波数で発光できる第2の光源装置と、

前記第1物体に向かう光路上に前記第2の紫外光を導く可動の光路切り換え部材と、

通常の露光時に前記第1の光源装置からの前記第1の紫外光で露光を行い、光学系の調整時に前記第2の光源装置からの前記第2の紫外光を前記光路切り換え部材を介して前記第1物体に向かう光路上に導く制御系とを有することを特徴とする露光装置、

【請求項10】 照明光で第1物体を照明し、前記第1物体のパターンを経た照明光で投影光学系を介して第2物体を露光する露光装置において、

赤外域から可視域までの波長範囲内で可変波長のレーザー光を発生するレーザー光発生部と、該レーザー光発生部から発生されたレーザー光を光ファイバー増幅器を介して増幅する光増幅部と、該光増幅部によって増幅されたレーザー光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換して前記照明光として出力する波長変換部とを備えた光源装置と、前記投影光学系の結像特性の変動量を予測する計測系と、

該計測系により予測された前記結像特性の変動量を相殺するように前記レーザー光発生部での発振波長を制御する結像特性補正部とを有することを特徴とする露光装置。

【請求項1.1】 照明光で第1物体を照明し、前記第1物体のパターンを経た照明光で第2物体を露光する露光装置において、赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザー光を発生するレーザー光発生部と、該レーザー光発生部から発生されたレーザー光を複数の分岐する光分岐部と、前記複数の分岐されたレーザー光をそれぞれ光ファイバー増幅器を介して増幅する複数の光増幅部と、該光増幅部によって増幅されたレーザー光をまとめて非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換して前記照明光として出力する波長変換部とを備えた光源装置と、前記複数の光増幅部の出力を検出するモニタ系と、該モニタ系の検出結果に基づいて前記複数の光増幅部の内の交換すべき光増幅部を特定する制御系とを有することを特徴とする露光装置。

【請求項1.2】 照明光学系からの照明光で第1物体を照明し、前記第1物体のパターンを経た照明光で第2物体を露光する露光装置において、前記照明光学系は、赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザー光を発生するレーザー光発生部と、該レーザー光発生部から発生されたレーザー光を光ファイバー増幅器を介して増幅する光増幅部と、該光増幅部によって増幅されたレーザー光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換して前記照明光として出力する波長変換部とを備えた光源装置と、該光源装置からの照明光を前記第1物体に照射する集光光学系と、前記波長変換部の出力端の近傍で前記照明光の強度を検出する第1の光電検出器と、前記集光光学系中で前記照明光の強度を検出する第2の光電検出器とを有することを特徴とする露光装置。

【請求項1.3】 請求項1～7の何れが一項記載の露光方法を用いてマスクのパターンを基板上に転写する工程を含むデバイスの製造方法。

【請求項1.4】 露光装置の製造方法であって、光ファイバー増幅器で増幅されたレーザー光を波長変換した紫外域の検査光を用いて光学系の光学特性を検出し、

該検出結果に基づいて前記光学系を調整する工程と、露光用照明光を用いて前記光学系の光学特性を検出する工程とを有する特徴とする露光装置の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、例えば紫外域の照明光を発生する照明光学装置に関し、特に半導体素子、撮像素子（CCDなど）、液晶表示素子、プラズマディスプレイ素子、及び薄膜磁気ヘッドなどのマイクロデバイスを製造するためのフォトリソグラフィ工程で使用される露光装置の照明光学系に使用して好適なものである。

【0002】

【従来の技術】 例えば半導体集積回路を製造するためのフォトリソグラフィ工程で使用される露光装置は、マスクとしてのレチクル（フォドマスク）上に精密に描かれた回路パターンを、基板としてのフォトレジストを塗布したウエハ上に光学的に縮小して投影露光する。この露光時におけるウエハ上での最小パターン寸法（解像度）を小さくするのに最も単純かつ有効な方法の一つは、照明光学系中の露光光源からの露光用の照明光（露光光）の波長（露光波長）を小さくすることである。ここで露光光の短波長化の実現に合わせて、露光光源を構成する上で備えるべきいくつかの条件につき説明する。

【0003】 第1に、例えば数ワットの光出力が求められる。これは集積回路パターンの露光、転写に要する時間を短くして、スループットを高めるために必要である。第2に、露光光が波長300nm以下の紫外光の場合には、投影光学系の屈折部材（レンズ）として使用できる光学材料が限られ、色収差の補正が難しくなる。このため露光光の単色性が必要であり、露光光のスペクトル線幅は1nm程度以下にすることが求められる。

【0004】 第3に、このスペクトル線幅の狭帯化に伴い時間的コヒーレンス（可干渉性）が高くなるため、狭い線幅の光をそのまま照射すると、スペックルと呼ばれる不要な干渉パターンが生ずる。従ってこのスペックルの発生を抑制するために、露光光源では空間的コヒーレンスを低下させる必要がある。これらの条件を満たす従来の短波長の光源の一つは、レーザーの発振波長自身が短波長であるエキシマレーザーを用いた光源であり、もう一つは赤外又は可視域のレーザーの高調波発生を利用した光源である。

【0005】 このうち、前者の短波長光源としては、KrFエキシマレーザー（波長248nm）が使用されており、現在では更に短波長のArFエキシマレーザー（波長193nm）を使用する露光装置の開発が進められている。更に、エキシマレーザーの仲間であるF2レーザー（波長157nm）の使用も提案されている。しかし、これらのエキシマレーザーは大型であること、発振周波数が現

状では数kHz程度であるため、単位時間当たりの照射エネルギーを高めるためには1パルス当たりのエネルギーを大きくする必要があり、このためにいわゆるコンパクション等によって光学部品の変位率変動等が生じやすいこと、メンテナンスが煩雑でかつ費用が高額となることなどの種々の問題があった。

【0006】また後者の方法としては、非線形光学結晶の2次の非線形光学効果を利用して、長波長の光（赤外光、可視光）をより短波長の紫外光に変換する方法がある。例えば文献「Longitudinally diode pumped continuous wave 3.5W green laser」, L. Y. Liu, M. Oka, W. Wiechmann and S. Kubota; Optics Letters, vol.19, p.189(1994) では、半導体レーザ光で励起された固体レーザからの光を波長変換するレーザ光源が開示されている。この従来例では、Nd:YAGレーザの発する1064nmのレーザ光を、非線形光学結晶を用いて波長変換し、4倍高調波の266nmの光を発生させる方法が記載されている。なお、固体レーザとは、レーザ媒質が固体であるレーザの総称である。

【0007】また、例えば特開平8-334803号公報では、半導体レーザを備えたレーザ発生部と、このレーザ発生部からの光を非線形光学結晶により紫外光に波長変換する波長変換部とから構成されるレーザ要素を複数個、マトリックス状（例えば10×10）に束ねたアレイレーザが提案されている。

【0008】
【発明が解決しようとする課題】このような構成の従来のアレイレーザでは、個々のレーザ要素の光出力を低く抑えつつ、装置全体の光出力を高出力とすることができ、各非線形光学結晶への負担を軽減することができ、しかし、一方では、個々のレーザ要素が独立していることから、露光装置への適用を考慮した場合には、レーザ要素全体でその発振スペクトルを全幅で1pm程度以下まで一致させる必要がある。

【0009】このため、例えば、各レーザ要素に自律的に同一波長の単一縦モード発振をさせるためには、各々のレーザ要素の共振器長を調整し、あるいは共振器中に波長選択素子を挿入したりする必要があった。しかし、これらの方法は、その調整が微妙であること、構成するレーザ要素が多くなればなるほど全体を同一波長で発振させるのに複雑な構成が必要になること等の問題があった。

【0010】一方、これら複数のレーザを能動的に単一波長化する方法としてインジェクションシード法がよく知られている（例えば、「Walter Koechner, Solid-state Laser Engineering, 3rd Edition, Springer Series in Optical Science, Vol.1, Springer-Verlag, ISBN 0-387-53756-2, p246-249」参照）。これは、発振スペクトル線幅の狭い単一のレーザ光源からの光を複数のレーザ要素に分配し、このレーザ光を誘導波として用いる

ことにより、各レーザ要素の発振波長を同調させ、かつスペクトル線幅を狭帯域化するという方法である。しかし、この方法では、シード光を各レーザ要素に分配する光学系や、発振波長の同調制御部を必要とするため構造が複雑になるという問題があった。

【0011】更に、このようなアレイレーザは、従来のエキシマレーザに比べて装置全体を格段に小さくすることが可能だが、それでもアレイ全体の出力ビーム径を数cm以下におさえるパッケージングは困難であった。また、このように構成されたアレイレーザでは、各アレイごとに波長変換部が必要となるため高価となること、アレイを構成するレーザ要素の一部にアライメントずれが生じた場合や構成する光学素子に損傷が発生した場合に、このレーザ要素の調整をするためには、一度アレイ全体を分解してこのレーザ要素を取り出し、調整した上で再度アレイを組み立て直す必要があること、などの課題があった。

【0012】また、上記の課題を解決できる光源が開発された場合には、従来の光源を使用した場合は異なる露光方法又は露光装置が生じる可能性もある。本発明は斯かる点に鑑み、小型化できメンテナンスが容易にできると共に、発光周波数を高くできる光源を使用した際に、結像特性等の評価を高精度に行うことができる露光方法及び露光装置を提供することを第1の目的とする。

【0013】また、本発明は、小型化でき空間的コヒーレンスを低減できると共に、全体としての発振スペクトル線幅を簡単に構成で狭くできる光源を使用した場合に好適な露光方法及び露光装置を提供することを目的とする。更に本発明は、その露光方法を用いて高機能のデバイスを製造できるデバイス製造方法を提供することをも目的とする。

【0014】

【課題を解決するための手段】本発明による第1の露光方法は、評価用マーク（1.55）を照明光で照明し、その評価用マークの像を投影光学系（PL）を介して投影し、その評価用マークの像と光電検出器とを相対走査させながらその評価用マークの像の状態を検出し、該検出結果に基づいて露光を行う露光方法において、光ファイバー増幅器（22、25）によって増幅されたパルスレーザ光を波長変換して得られたパルス紫外光をその照明光として使用し、その評価用マークの像をその光電検出器によって検出する際に、照明光としてのそのパルス紫外光の強度を複数パルス毎、又は所定の時間間隔毎に計測し、この計測結果に基づいてその光電検出器の検出信号を規格化するものである。

【0015】斯かる本発明によれば、その光ファイバー増幅器のシード光としては、DFB (Distributed feedback) 半導体レーザやファイバーレーザ等からの赤外域から可視域までの単一波長で発振スペクトルの狭いレーザ光が使用され、光ファイバー増幅器としては、例えば

エルビウム (Er)・ドーブ・光ファイバー増幅器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier: E.D.F.A.)、イッテルビウム (Yb)・ドーブ・光ファイバー増幅器 (Y.D.F.A.)、プラセオジム (Pr)・ドーブ・光ファイバー増幅器 (P.D.F.A.)、又はトリウム (Tm)・ドーブ・光ファイバー増幅器 (T.D.F.A.) 等を使用することができる。また、波長変換は、複数の非線形光学結晶による2次高調波発生 (S.H.G.) 及び/又は和周波発生 (S.F.G.) の組み合わせによって、基本波に対して任意の整数倍の周波数 (波長は整数分の1) の高調波よりなる紫外光を容易に出力することができる。このような「光ファイバー増幅型の光源」は小型で、かつメンテナンスが容易であり、発光周波数を一例として10kHz~1MHz程度の範囲で、望ましくは100kHz程度以上まで高めることができる。

【0016】これに対して、従来主に使用されていたKrF又はArF等のエキシマレーザ光源は、発振周波数が最大で2kHz程度であり、パルス発光毎のエネルギーのばらつきが比較的大きいため、結像特性の計測を行う場合にはパルス発光毎にエネルギーをモニタし、このモニタ結果より結像特性の検出信号の規格化を行うといういわゆるパルス毎規格化方式が使用される。これに対して、本発明の光源では、発光周波数が高く殆ど連続光に近いので、パルス発光毎に検出信号を規格化するのは、制御系の応答速度をかなり高くする必要があり、あまり得策ではない。そこで、そのパルス紫外光の強度を複数パルス毎、又は所定時間毎に検出し、この検出結果に基づいてその検出信号の規格化を行う。これによって、制御が容易となる。

【0017】次に、本発明の第2の露光方法は、第1物体 (R) を照明光で照明し、その第1物体のパターンを経た照明光で第2物体 (W) を露光する露光方法において、第1の紫外光をパルス発光する第1の光源装置 (101A) と、光ファイバー増幅器 (22, 25) で増幅したレーザ光を波長変換することによってその第1の紫外光と実質的に同じ波長域の第2の紫外光を発光できる移動自在な第2の光源装置 (101) とを備え、その第2物体の露光時にその第1の光源装置からの紫外光を用い、その第1物体の照明系の調整時にその第2の光源装置からの紫外光を用いるものである。

【0018】本発明でも、その紫外光の第2の光源装置としては、上記の光ファイバー増幅型の光源が使用できる。この第2の光源装置は発光周波数を高めることができるため、各パルス光のピークレベルは、その第1の光源装置 (例えばエキシマレーザ光源) に比べると大幅に小さくできる。また、その第1の光源装置は、工場雰囲気中で発光を行うと紫外光による化学反応によって、光学部材の表面に曇り物質が付着する原因になる。よって、通常の露光時には露光光路は窒素ガスやヘリウムガス等でバージされる。一方、露光装置のメンテナンス時

には工場雰囲気に切り換えが行われるため、このときにはその第2の光源装置からの紫外光を用いて光学調整等を行う。第2の光源装置のパルス光はピークレベルが低く曇り物質を殆ど生成しないため、調整用として好適である。

【0019】また、その第2の光源装置は、露光装置のメンテナンス時だけでなく、その製造工程における光学系の調整用、又は検査用の光源としても用いられ、この場合にはその第1の光源装置として光ファイバー増幅型の光源を使用してもよく、しかも第1の光源装置と第2の光源装置は同一構成である必要はなく、極端に言えば第2の光源装置は1本の光ファイバーでもよい。

【0020】次に、本発明の第3の露光方法は、照明光で第1物体を照明し、その第1物体のパターンを経た照明光で投影光学系 (P.L) を介して第2物体を露光する露光方法において、可視域から赤外線までの波長域内で発振波長が可変のレーザ光を光ファイバー増幅器 (22, 25) によって増幅し、この増幅後のレーザ光を波長変換して得られた紫外光をその照明光とし、その投影光学系の結像特性の変動量を予測又は計測し、このように予測又は計測される結像特性の変動量を相殺するようにその発振波長が可変のレーザ光の波長を変化させて、その紫外光の波長を制御するものである。

【0021】本発明でも光ファイバー増幅器で増幅する光源が使用されるが、この光源は波長を広い範囲で高精度に制御できるという特徴もある。そこで、大気圧センサ、湿度センサ、温度センサ等の計測値、又は倍率計測結果等に基づいて投影光学系の結像特性の変動量を予測又は計測し、その光源の発振波長をシフトさせることで、その結像特性の変動量を高い応答速度で補正できる。また、その結像特性の変動量として、マスクパターンの描画誤差 (倍率誤差など) を含めることができる。また、照明光の入射による投影光学系の熱蓄積量に起因する倍率をも用いて結像特性の変動量を予測又は計測するようにしてもよい。

【0022】次に、本発明の第4の露光方法は、照明光で第1物体を照明し、その第1物体のパターンを経た照明光で第2物体を露光する露光方法において、単一のレーザ光を複数に分岐してそれぞれ光ファイバー増幅器を有する複数の光増幅部 (18-1~18-n) で増幅し、この増幅後の複数のレーザ光を束ねて波長変換して得られた紫外光をその照明光とし、その複数の光増幅部のそれぞれの出力を検出し、この検出結果よりその複数の光増幅部の内の所定の光増幅部が寿命に達したと判定された場合に、その所定の光増幅部を別の光増幅部と交換するものである。

【0023】斯かる本発明でも光ファイバー増幅器で増幅する光源が使用されるが、その光源中の複数の光増幅部が個別に交換可能とされている。そこで、寿命となった出力の低下した光増幅部を新しい光増幅部で交換する

ことによって、メンテナンスが極めて容易である。次に、本発明の第5の露光方法は、照明光で第1物体を照明し、その第1物体のパターンを経た照明光で第2物体を露光する露光方法において、光ファイバー増幅器(22、25)によって増幅されたレーザ光を波長変換して得られた紫外光をその照明光とし、その波長変換後のその照明光の第1の強度、及びその第2物体に至るまでの光路上でのその照明光の第2の強度を継続して計測し、この計測結果に基づいて透過率が変動している光学部材の位置を特定するものである。

【0024】本発明で用いられる光ファイバー増幅器を用いる光源は、発光周波数を高くできてピークレベルを小さくできると共に、照明光の光路は空素ガス等でパージされるため、元々曇り物質は生じにくい。それでも、何等かの要因で曇りが生じた場合に、本発明によって曇りが生じた部材の位置を大まかに特定できるため、交換作業等を迅速に実行できる。

【0025】次に、本発明の第1の露光装置は、第1物体(R)を照明光で照明し、その第1物体のパターンを経た照明光で第2物体(W)を露光する露光装置において、赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部(11)と、このレーザ光発生部から発生されたレーザ光を増幅する光ファイバー増幅器を有する光増幅部(18-1)と、この光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換する波長変換部(20)とを備えた光源装置(101)と、この光源装置からのその照明光としてのパルス紫外光の強度をその第2物体までの光路上で複数パルス毎、又は所定の時間間隔毎に計測するモニタ系(113~115)と、評価用マークの像を検出するマーク検出系(129)と、そのモニタ系の計測値に基づいてそのマーク検出系の検出信号を規格化する演算制御系(105)とを有するものである。

【0026】また、本発明による第2の露光装置は、第1物体を照明光で照明し、その第1物体のパターンを経た照明光で第2物体を露光する露光装置において、第1の紫外光をパルス発光する第1の光源装置(101A)と、その第1の紫外光と実質的に同じ波長域の第2の紫外光をその第1の光源装置よりも高いパルス周波数で発光できる第2の光源装置(101)と、その第1物体に向かう光路上にその第2の紫外光を強く可動の光路切り換え部材(102)と、通常の露光時にその第1の光源装置からのその第1の紫外光で露光を行い、光学系の調整時にその第2の光源装置からのその第2の紫外光をその光路切り換え部材を介してその第1物体に向かう光路上に強く制御系(105)とを有するものである。

【0027】また、本発明による第3の露光装置は、照明光で第1物体を照明し、その第1物体のパターンを経た照明光で投影光学系(P.L)を介して第2物体を露光する露光装置において、赤外域から可視域までの波長範

囲内で可変波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部(1、2、5、11)と、該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を光ファイバー増幅器を介して増幅する光増幅部(18-1)と、この光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換してその照明光として出力する波長変換部(20)とを備えた光源装置(101)と、その投影光学系の結像特性の変動量を予測する計測系(129)と、この計測系により予測されたその結像特性の変動量を相殺するようにそのレーザ光発生部での発振波長を制御する結像特性補正部(109)とを有するものである。

【0028】また、本発明による第4の露光装置は、照明光で第1物体を照明し、その第1物体のパターンを経た照明光で第2物体を露光する露光装置において、赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部(11)と、該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を複数に分岐する光分岐部(14、16-1~16-n)と、その複数の分岐されたレーザ光をそれぞれ光ファイバー増幅器を介して増幅する複数の光増幅部(18-1~18-n)と、該光増幅部によって増幅されたレーザ光をまとめて非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換してその照明光として出力する波長変換部(20)とを備えた光源装置(101)と、その複数の光増幅部の出力を検出するモニタ系(23E)と、このモニタ系の検出結果に基づいてその複数の光増幅部の内の交換すべき光増幅部を特定する制御系(109)とを有するものである。

【0029】また、本発明による第5の露光装置は、照明光学系からの照明光で第1物体を照明し、その第1物体のパターンを経た照明光で第2物体を露光する露光装置において、その照明光学系は、赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部(11)と、該レーザ光発生部から発生されたレーザ光を光ファイバー増幅器を介して増幅する光増幅部(18-1)と、該光増幅部によって増幅されたレーザ光を非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換してその照明光として出力する波長変換部(20)とを備えた光源装置(101)と、この光源装置からの照明光をその第1物体に照射する集光光学系と、その波長変換部の出力端の近傍でその照明光の強度を検出する第1の光電検出器(56-1)と、その集光光学系中でその照明光の強度を検出する第2の光電検出器(115)とを有するものである。

【0030】斯かる各露光装置によつて上記の本発明の露光方法を実施することができる。また、本発明の各露光装置は、光ファイバー増幅型の光源の使用によって露光装置全体を小型化でき、かつメンテナンスが容易になる。また、本発明のデバイスの製造方法は、上記の本発明の露光方法を用いてマスクのパターンを基板上に転写する工程を含むものである。本発明の露光方法の使用に

よって結像特性等が向上するため、高機能のデバイスを製造できる。

【0031】次に、本発明の露光装置の製造方法は、光ファイバー増幅器で増幅されたレーザ光を波長変換した紫外域の検査光を用いて光学系（投影光学系、照明光学系等）の光学特性（結像特性、光軸ずれ等）を検出し、該検出結果に基づいてその光学系を調整する工程（露光装置に搭載後の検査、及び搭載前の検査の両方を含む）と、露光用照明光（検査光と同一でも、検査光と異なってもよい）を用いてその光学系の光学特性を検出する工程（試し焼き、又は空間像計測等）とを有するものである。そのように光ファイバー増幅型の光源からの紫外光を検査光として用いることによって、検査を簡便に行うことができる。

【0032】

【発明の実施の形態】以下、本発明の第1の実施の形態につき図面を参照して説明する。本例は、ステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置に本発明を適用したものである。図1（a）は、本例の投影露光装置用の光源装置を示し、この図1（a）において、レーザ光発生部としての単一波長発振レーザ11からスペクトル幅の狭い単一波長の例えば連続波（CW）よりなる波長1、544 μ mのレーザ光LB1が発生する。このレーザ光LB1は、逆向きの光を阻止するためのアイソレータIS1を介して光変調部としての光変調素子12に入射し、ここでパルス光のレーザ光LB2に変換されて光分岐増幅部4に入射する。

【0033】光分岐増幅部4に入射したレーザ光LB2は、先ず前段の光増幅部としての光ファイバー増幅器13を通過して増幅された後、アイソレータIS2を介して第1の光分岐素子としての平面導波路型のスプリッタ14に入射して、m本のほぼ同一強度のレーザ光に分岐される。mは2以上の整数であり、本例ではm=4である。光ファイバー増幅器13としては、単一波長発振レーザ11から発生されるレーザ光LB1と同じ波長域（本例では1、544 μ m付近）の光を増幅するために、エルビウム・ドープ・光ファイバー増幅器（Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA）が使用されている。なお、光ファイバー増幅器13には不図示のカップリング用の波長分割多重素子を用いて不図示の励起用の半導体レーザからの波長980nm又は1480nmの励起光が使用されている。なお、励起光の波長は980nm又は1480nmに限られるものでなく、例えば（980 \pm 10）nm程度又は（1480 \pm 30）nm程度の範囲内であればよい。

【0034】スプリッタ14から射出されたm本のレーザ光は、互いに異なる長さの光ファイバー15-1、15-2、…、15-mを介してそれぞれ第2の光分岐素子としての平面導波路型のスプリッタ16-1、16-2、…、16-mに入射して、それぞれほぼ同一強度の

n本のレーザ光に分岐される。nは2以上の整数であり、本例ではn=32である。第1の光分岐素子（14）及び第2の光分岐素子（16-1～16-m）は光分岐手段（光分割手段）とも呼ぶことができる。その結果、単一波長発振レーザ11から射出されるレーザ光LB1は、全体としてn \cdot m本（本例では128本）のレーザ光に分岐される。

【0035】そして、スプリッタ16-1から射出されたn本のレーザ光LB3は、互いに異なる長さの光ファイバー17-1、17-2、…、17-nを介してそれぞれ後段の光増幅部としての光増幅ユニット18-1、18-2、…、18-nに入射して増幅される。光増幅ユニット18-1～18-nは、単一波長発振レーザ11から発生されるレーザ光LB1と同じ波長域（本例では1、544 μ m付近）の光を増幅する。同様に他のスプリッタ16-2～16-mから射出されたn本のレーザ光も、それぞれ互いに異なる長さの光ファイバー17-1～17-nを介して後段の光増幅部としての光増幅ユニット18-1～18-nに入射して増幅される。

【0036】m組の光増幅ユニット18-1～18-nで増幅されたレーザ光は、それぞれ光増幅ユニット18-1～18-n内の所定の物質がドープされた光ファイバー（後述）の射出端の延長部を伝播し、これらの延長部が光ファイバー・バンドル19を構成する。光ファイバー・バンドル19を構成するm組のn本の光ファイバーの延長部の長さは互いにほぼ同一である。但し、光ファイバー・バンドル19をm \cdot n本の互いに同じ長さの光増幅作用の無い伝播用の光ファイバーを束ねて形成すると共に、光増幅ユニット18-1～18-nで増幅されたレーザ光をそれぞれ対応する伝播用の光ファイバーに導いてもよい。光ファイバー増幅器13から光ファイバー・バンドル19までの部材より光分岐増幅部4が構成されている。

【0037】光ファイバー・バンドル19から射出されたレーザ光LB4は、非線形光学結晶を有する波長交換部20に入射して紫外光よりなるレーザ光LB5に変換され、このレーザ光LB5が露光光として外部に射出される。m組の光増幅ユニット18-1～18-nがそれぞれ本発明の光増幅部に対応しているが、この光増幅部に光ファイバー・バンドル19の光ファイバーを含める場合もある。

【0038】また、光ファイバー・バンドル19の出力端19aは、図1（b）に示すように、m \cdot n本（本例では128本）の光ファイバーを密着するように、かつ外形が円形になるように束ねたものである。実際には、その出力端19aの形状及び束ねる光ファイバーの数は、後段の波長交換部20の構成、及び本例の光源装置の使用条件等に応じて定められる。光ファイバー・バンドル19を構成する各光ファイバーのクラッド直径は12.5 μ m程度であることから、128本を円形に束ねた

場合の光ファイバー・バンドル19の出力端19aの直径d1は、約2mm以下とすることができる。

【0039】また、本例の波長変換部20では、入射するレーザ光LB4を8倍高調波（波長は1/8）、又は10倍高調波（波長は1/10）よりなるレーザ光LB5に変換する。単一波長発振レーザ11から射出されるレーザ光LB1の波長は1,544 μ mであるため、8倍高調波の波長はA r Fエキシマレーザと同じ193nmとなり、10倍高調波の波長はF2レーザ（フッ素レーザ）の波長（157nm）とほぼ同じ154nmとなる。なお、レーザ光LB5の波長をよりF2レーザ光の波長に近づけたい場合には、波長変換部20で10倍高調波を生成すると共に、単一波長発振レーザ11では波長1,57 μ mのレーザ光を発生すればよい。

【0040】実用的には、単一波長発振レーザ11の発振波長を1,544 \sim 1,552 μ m程度に規定して、8倍波に変換することにより、A r Fエキシマレーザと実質的に同一波長（193 \sim 194nm）の紫外光が得られる。そして、単一波長発振レーザ11の発振波長を1,57 \sim 1,58 μ m程度に規定して、10倍波に変換することによってF2レーザと実質的に同一波長（157 \sim 158nm）の紫外光が得られる。従って、これらの光源装置をそれぞれA r Fエキシマレーザ光源、及びF2レーザ光源に代わる安価でメンテナンスの容易な光源として使用することができる。

【0041】なお、最終的にA r Fエキシマレーザ、又はF2レーザ等に近い波長域の紫外光を得る代わりに、例えば製造対象の半導体デバイス等のパターンルールより最適な露光波長（例えば160nm等）を決定し、この理論的に最適な波長の紫外光を得るように単一波長発振レーザ11の発振波長や波長変換部20における高調波の倍率を決定するようにしてもよい。

【0042】以下、本実施形態についてより詳細に説明する。図1(a)において、単一波長で発振する単一波長発振レーザ11としては、例えば発振波長1,544 μ m、連続波出力（以下、「CW出力」ともいう）で出力が20mWのInGaAsP構造のDFB（Distributed feedback：分布帰還型）半導体レーザを用いる。ここでDFB半導体レーザとは、縦モード選択性の低いファブリーペロ型共振器の代わりに、回折格子を半導体レーザ内に形成したもので、どのような状況下であっても単一縦モード発振を行うように構成されている。DFB半導体レーザは、基本的に単一縦モード発振をすることから、その発振スペクトル線幅は0.01pm以下に抑えられる。なお、単一波長発振レーザ11としては、同様の波長領域で誘導増大されたレーザ光を発生する光源、例えばエルビウム（Er）・ドープ・ファイバー・レーザ等をも使用することができる。

【0043】更に、本例の光源装置の出力波長は用途に応じて特定波長に固定することが望ましい。そのため、

マスター発振器（Master Oscillator）としての単一波長発振レーザ11の発振波長を一定波長に制御するための発振波長制御装置を設けている。本例のように単一波長発振レーザ11としてDFB半導体レーザを用いる場合には、DFB半導体レーザの温度制御を行うことにより発振波長を制御することができ、この方法により発振波長を更に安定化して一定の波長に制御したり、あるいは出力波長を微調整することができる。

【0044】通常、DFB半導体レーザなどはヒートシンクの上に設けられ、これらが筐体内に収納されている。そこで本例では、単一波長発振レーザ11（DFB半導体レーザなど）に付設されるヒートシンクに温度調整部5（例えばヒータ等の加熱素子、ペルチェ素子等の吸熱素子、及びサーミスタ等の温度検出素子よりなる）を固定し、その温度調整部5の動作をコンピュータよりなる制御部1が制御することで、そのヒートシンク、ひいては単一波長発振レーザ11の温度を高精度に制御する。ここで、DFB半導体レーザなどではその温度を0.001 $^{\circ}$ C単位で制御することが可能である。また、制御部1は、ドライバ2を介して単一波長発振レーザ11を駆動するための電力（DFB半導体レーザでは駆動電流）を高精度に制御する。

【0045】DFB半導体レーザの発振波長は0.1nm/ $^{\circ}$ C程度の温度依存性を持つため、そのDFB半導体レーザの温度を例えば1 $^{\circ}$ C変化させると、基本波（波長1544nm）ではその波長が0.1nm変化し、従って、8倍波（193nm）ではその波長が0.0125nm変化し、10倍波（157nm）ではその波長が0.01nm変化することになる。なお、レーザ光LB5を露光装置に使用する場合には、例えば露光装置が設置される環境の大気圧差による結像特性の誤差、又は結像特性の変動による誤差等を補正するために、その中心波長に対して \pm 20pm程度変化できることが望ましい。このためには、DFB半導体レーザの温度を8倍波では \pm 1.6 $^{\circ}$ C程度、10倍波では \pm 2 $^{\circ}$ C程度変化させればよく、これは実用的である。そして、この発振波長を所定の波長に制御する際のフィードバック制御のモニター波長としては、DFB半導体レーザの発振波長、あるいは後述する波長変換部20内での波長変換後の高調波出力（2倍波、3倍波、4倍波等）の内から所望の波長制御を行うに当たって必要な感度を与え、かつ最もモニターしやすい波長を選択すればよい。単一波長発振レーザ11として例えば発振波長1,51 \sim 1,59 μ mのDFB半導体レーザを使用する場合に、この発振レーザ光の3倍波は503nm \sim 530nmの波長になるが、この波長帯はヨウ素分子の吸収線が密に存在する波長域に該当しており、ヨウ素分子の適切な吸収線を選んでその波長にロックすることにより精密な発振波長制御を行うことが可能である。そこで、本例では波長変換部20内の所定の高調波（望ましくは3倍波）をヨウ素分

子の適切な吸収線（基準波長）と比較し、その波長のずれ量を制御部1にフィードバックし、制御部1ではそのずれ量が所定の一定値になるように温度調整部5を介して単一波長発振レーザ1-1の温度を制御する。逆に、制御部1では、その単一波長発振レーザ1-1の発振波長を積極的に変化させてその出力波長を調整可能にしてもよい。

【0046】本例の光源装置は露光装置の露光光源であり、前者によれば、波長変動による投影光学系の収差の発生、又はその変動が防止され、パターン転写中にその像特性（像質などの光学的特性）が変化することがなくなる。また、後者によれば、露光装置が組立、調整される製造現場と露光装置の設置場所（納入先）との標高差や気圧差、更には環境（クリーンルーム内の雰囲気）の違いなどに応じて生じる投影光学系の結像特性（収差など）の変動を相殺でき、納入先で露光装置の立ち上げに要する時間を短縮することが可能になる。更に後者によれば、露光装置の稼働中に、露光用照明光の照射、及び大気圧変化などに起因して生じる投影光学系の収差、投影倍率、及び焦点位置などの変動も相殺でき、常に最良の結像状態でパターン像を基板上に転写することが可能となる。

【0047】単一波長発振レーザ1-1から出力される連続光よりなるレーザ光LB-1は、例えば電気光学光変調素子や音響光学光変調素子などの光変調素子1-2を用いて、パルス光よりなるレーザ光LB-2に変換される。光変調素子1-2は制御部1によってドライバ3を介して駆動される。本例の光変調素子1-2から出力されるレーザ光LB-2は、一例としてパルス幅1 ns、繰り返し周波数100 kHz（パルス周期10 μs）程度のパルス光に変調される。このような光変調を行った結果、光変調素子1-2から出力されるパルス光のピーク出力は20 mW、平均出力は2 μWとなる。ここでは、光変調素子1-2の挿入による損失がないものとしたが、実際にはその挿入損失がある。例えば損失が-3 dBである場合、そのパルス光のピーク出力は10 mW、平均出力は1 μWとなる。

【0048】なお、繰り返し周波数を100 kHz程度以上に設定することにより、後述する光増幅ユニット18-1～18-n内の光ファイバ増幅器においてASE（Amplified Spontaneous Emission：自然放出光）ノイズの影響による増幅率低下を阻止することができる。更に、本例の100 kHz程度の各パルス光は、実際には例えば128個の所定間隔のパルス光の集合体であるため、最終的に出力される紫外光の照度が従来のエキシマレーザ光（パルス周波数は数kHz程度）と同程度でよい場合には、本例のようにパルス周波数を高めることによって、各パルス当たりのエネルギーを1/1000～1/10000程度に小さくすることができ、コンパクション等による光学部材（レンズ等）の屈折率変動等

を小さくすることができる。従って、そのような変調器構成とすることが望ましい。

【0049】更に、半導体レーザなどではその電流制御を行うことで、出力光をパルス発振させることができる。このため、本例では単一波長発振レーザ1-1（DFB半導体レーザなど）の電力制御と光変調素子1-2とを併用してパルス光を発生させることが好ましい。そこで、単一波長発振レーザ1-1の電力制御によって、例えば10～20 ns程度のパルス幅を有するパルス光を発振させると共に、光変調素子1-2によってそのパルス光からその一部のみを切り出す、即ち本例ではパルス幅が1 nsのパルス光に変調する。

【0050】これにより、光変調素子1-2のみを用いる場合に比べて、パルス幅が狭いパルス光を容易に発生させることが可能になると共に、パルス光の発振間隔や発振の開始及びその停止などをより簡単に制御することが可能になる。特に、光変調素子1-2のみを用いてパルス光をオフの状態にしてもその消光比が充分でない場合には、単一波長発振レーザ1-1の電力制御を併用することが望ましい。

【0051】このようにして得たパルス光出力を、初段のエルビウム・ドープの光ファイバ増幅器1-3に接続し、3.5 dB（3.162倍）の光増幅を行う。このときパルス光は、ピーク出力約63 W、平均出力約6.3 mWとなる。なお、この光ファイバ増幅器1-3の代わりに複数段の光ファイバ増幅器を使用してもよい。その初段の光ファイバ増幅器1-3の出力を、スプリッタ14でまずチャネル0～3の4個の出力（本例ではm=4）に並列分割する。このチャネル0～3の各出力を、各々長さの異なる光ファイバ1-5-1～1-5-4に接続することにより、各光ファイバからの出力光には、光ファイバ長に対応した遅延時間が与えられる。例えば本実施形態では、光ファイバ中の光の伝搬速度を2×10⁸ m/sであるとし、チャネル0、1、2、3にそれぞれ0.1 m、1.9 m、3 m、38.5 m、5.7 m、7 mの長さの光ファイバ1-5-1～1-5-4を接続する。この場合、各光ファイバの出口での隣り合うチャネル間の光の遅延は96 nsとなる。なおここでは、この様に光を遅延させる目的で使用する光ファイバ1-5-1～1-5-4を、便宜的に「遅延ファイバ」と呼ぶ。

【0052】次に、その4本の遅延ファイバの出力を、4個のスプリッタ16-1～16-4で更にn個（本例ではn=32）の出力に並列分割（各スプリッタでチャネル0～31）し、合計4×32個（=128個）のチャネルに分割する。そして、各スプリッタ16-1～16-4のチャネル0～31の出力端に再び互いに長さの異なる光ファイバ（遅延ファイバ）1-7-1～1-7-32を接続して、隣接するチャネル間に3 nsの遅延時間を与える。これによって、チャネル31の

出力には、 9.3 ns の遅延時間が与えられる。一方、第1から第4までの各スプリッタ16-1~16-4間には、そのように遅延ファイバーによって、各スプリッタの入力時点で各々 9.6 ns の遅延時間が与えられている。この結果、全体で総計128チャンネルの出力端で、隣り合うチャンネル間に 3 ns の遅延時間を持つパルス光が得られる。

【0053】この結果、本例では光ファイバー・バンドル19から射出されるレーザ光LB4の空間的コヒーレンスが、単に単一波長発振レーザ11から射出されるレーザ光LB1の断面形状を拡大した場合に比べてほぼ $1/128$ のオーダーで低下する。従って、最終的に得られるレーザ光LB5を露光光として用いた場合に生じるスベクルの量は極めて少ない利点がある。

【0054】以上の分岐及び遅延により、総計128チャンネルの出力端では、隣り合うチャンネル間で 3 ns の遅延時間を持つパルス光が得られるが、このとき各々の出力端で観測される光パルスは、光変調素子12によって変調されたパルス光と同じ 1.00 kHz （パルス周期 $1.0\text{ }\mu\text{s}$ ）である。従って、レーザ光発生部全体として見ると、128パルスが 3 ns 間隔で発生した後、 $9.6\text{ }\mu\text{s}$ の間隔を置いて次のパルス列が発生するという繰り返しが行われる。

【0055】なお本実施形態では、分割数を128とし、また遅延ファイバーとして短いものを用いた例について説明した。このため各パルス列の間に $9.6\text{ }\mu\text{s}$ の無発光の間隔が生じたが、分割数 m 、 n を増加させる、又は遅延ファイバーをより長くして適切な長さとする、あるいはこれらを組み合わせて用いることにより、パルス間隔を完全な等間隔とすることも可能である。

【0056】以上より本例のスプリッタ14、光ファイバー15-1~15- m 、スプリッタ16-1~16- m 、及び m 組の光ファイバー17-1~17- n は、全体として時分割多重（Time-Division Multiplexing: TDM）手段を構成しているとみなすことができる。なお、本例のスプリッタ14、16-1~16- m は平板導波路型であるが、それ以外に例えばファイバースプリッタや、部分透過鏡を用いたビームスプリッタ等も使用することができる。

【0057】図1（a）において、 m 組の遅延ファイバー（光ファイバー17-1~17- n ）を通過したレーザ光はそれぞれ光増幅ユニット18-1~18- n に入射して増幅される。本例の光増幅ユニット18-1~18- n は光ファイバー増幅器を備えており、以下では、光増幅ユニット18-1として使用できる光増幅ユニットの構成例につき説明するが、これらは他の光増幅ユニット18-2~18- n としても同様に使用することができる。

【0058】図2は、光増幅ユニット18を示し、この図2において、光増幅ユニット18は基本的に2段のそ

れぞれエルビウム・ドープ・光ファイバー増幅器（Erbi-um-Doped Fiber Amplifier: EDFA）よりなる光ファイバー増幅器22及び25を接続して構成されている。そして、1段目の光ファイバー増幅器22の両端部には、励起光をカップリングするための波長分割多重（Wavelength Division Multiplexing: WDM）素子（以下、「WDM素子」と言う）21A及び21Bが接続され、WDM素子21A及び21Bによってそれぞれ励起光源としての半導体レーザ23Aからの励起光EL1及び半導体レーザ23Bからの励起光が、光ファイバー増幅器22に前後から供給されている。同様に、2段目の光ファイバー増幅器25の両端部にも、カップリング用のWDM素子21C及び21Dが接続され、WDM素子21C及び21Dによってそれぞれ半導体レーザ23C及び23Dからの励起光が光ファイバー増幅器25に前後から供給されている。即ち、光ファイバー増幅器22、25は共に双方向励起型である。

【0059】光ファイバー増幅器22、25はそれぞれ入射するレーザ光LB3（本例では波長 $1.544\text{ }\mu\text{m}$ ）の波長を含む例えば約 $1.53\sim 1.56\text{ }\mu\text{m}$ 程度の波長域の光を増幅する。また、光ファイバー増幅器22、25の境界部であるWDM素子21BとWDM素子21Cとの間に、狭帯域フィルタ24A及び戻り光を阻止するためのアイソレータIS3が配置されている。狭帯域フィルタ24Aとしては多層膜フィルタ、又はファイバー・ブラッグ・グレーティング（Fiber Bragg Grating）が使用できる。

【0060】本例において、図1（a）の光ファイバー17-1からのレーザ光LB3は、WDM素子21Aを介して光ファイバー増幅器22に入射して増幅される。この光ファイバー増幅器22で増幅されたレーザ光LB3は、WDM素子21B、狭帯域フィルタ24A、アイソレータIS3、及びWDM素子21Cを介して光ファイバー増幅器25に入射して再び増幅される。増幅されたレーザ光LB3は、WDM素子21Dを介して図1（a）の光ファイバー・バンドル19を構成する1本の光ファイバー（光ファイバー増幅器25の射出端の延長部でもよい）を伝播する。また、出力されるレーザ光LB3の後かな部分、例えば1%程度が分岐用の光ファイバーを介して光電検出器23Eで受光されており、この検出結果より光増幅ユニット18の出力が検出できる。

【0061】この場合、2段の光ファイバー増幅器22及び25による合計の増幅利得は一例として約 46 dB （ 39.810 倍）である。そして、図1（b）のスプリッタ16-1~16- m から出力される全チャンネル数（ $m\cdot n$ 個）を128個として、各チャンネルの平均出力を約 $5.0\text{ }\mu\text{W}$ とすると、全チャンネル合計での平均出力は約 6.4 mW となる。その各チャンネルのレーザ光をそれぞれ約 46 dB で増幅すると、各光増幅ユニット18-1~18- n から出力されるレーザ光の平均出力はそれ

それぞれ2Wとなる。これをパルス幅1ns、パルス周波数10.0kHzでパルス化したものとすると、各レーザ光のピーク出力は20kWとなる。また、光ファイバー・バンドル19から出力されるレーザ光LB4の平均出力は約256Wとなる。

【0062】ここでは、図1(a)のスプリッタ14、16-1~16-mでの結合損失を考慮していないが、その結合損失がある場合にはその損失分だけ光ファイバー増幅器22、25の少なくとも1つの増幅利得を上げることにより、各チャネルのレーザ光の出力を上記の値(例えばピーク出力20kWなど)に均一化することができる。

【0063】図2の構成例において、狭帯域フィルタ24Aは、図1(a)の光ファイバー増幅器13及び図2の光ファイバー増幅器22でそれぞれ発生するASE(Amplified Spontaneous Emission)光をカットし、かつ図1(a)の単一波長発振レーザ11から出力されるレーザ光(波長幅は1pm程度以下)を透過させることで、透過光の波長幅を実質的に狭帯化するものである。これにより、ASE光が後段の光ファイバー増幅器25に入射してレーザ光の増幅利得を低下させるのを防止することができる。ここで、狭帯域フィルタ24Aはその透過波長幅が1pm程度であることが好ましいが、ASE光の波長幅は数十nm程度であるので、現時点で得られる透過波長幅が100pm程度の狭帯域フィルタを用いても実用上問題がない程度にASE光をカットすることができる。また、アイソレータ153によって戻り光の影響が低減される。光増幅ユニット18は例えば3段以上の光ファイバー増幅器を接続して構成することも可能である。

【0064】また、本例では多数の光増幅ユニット18の出力光を束ねて使用するため、各出力光の強度の分布を均一化することが望ましい。このためには、射出されるレーザ光LB3の光量を光電検出器23Eでモニタし、この光量が全部の光増幅ユニット18でほぼ均一になるように、各光増幅ユニット18における励起光源(半導体レーザ23A~23D)の出力を制御すればよい。そのため、図1(a)において、本例のm組の光増幅ユニット18-1~18-mはそれぞれ独立に出力を制御できると共に、それぞれ独立に監視できるように構成されている。これによって、仮に或る光増幅ユニット18-1の出力が低下して寿命となったような場合には、その光増幅ユニットだけを交換すればよいので、メンテナンスが容易である。

【0065】なお、上記の実施の形態では、単一波長発振レーザ11として発振波長が1.544μm程度のレーザ光源が使用されているが、その代わりに発振波長1.099~1.106μm程度のレーザ光源を使用してもよい。このようなレーザ光源としては、DFB半導体レーザあるいはイッテルビウム(Yb)・ドープ・フ

ァイバーレーザが使用できる。この場合には、後段の光増幅部中の光ファイバー増幅器としては、その波長を含む990~1200nm程度の波長域で増幅を行うイッテルビウム(Yb)・ドープ・光ファイバー(YDF:FA)を使用すればよい。この場合には、図1(b)の波長変換部20において、7倍波を出力することによって、F2レーザと実質的に同一の波長157~158nmの紫外光が得られる。実用的には、発振波長を1.1μm程度とすることで、F2レーザとほぼ同一波長の紫外光が得られる。

【0066】更には、単一波長発振レーザ11での発振波長を990nm付近として、波長変換部20で基本波の4倍波を出力するようにしてもよい。これによって、KrFエキシマレーザと同一の波長248nmの紫外光を得ることが可能である。なお、上記の実施形態における最終段の高ピーク出力の光ファイバー増幅器(例えば図2の光増幅ユニット18中の光ファイバー増幅器25)においては、ファイバー中での非線形効果による増幅光のスペクトル幅の増加を避けるため、ファイバーモード径が通常通信で用いられているもの(5~6μm)よりも広い、例えば20~30μmの大モード径ファイバーを使用することが望ましい。

【0067】更に、最終段の光ファイバー増幅器(例えば図2の光ファイバー増幅器25)において高出力を得るためには、その大モード径ファイバーに代えて、ファイバー・クラッドが二重構造となったダブル・クラッド・ファイバーを用いるようにしてもよい。この光ファイバーでは、コアの部分にレーザ光の増幅に寄与するイオンがドープされており、増幅されるレーザ光(信号)がこのコア内を伝播する。そして、コアを取り巻く第1クラッドに励起用半導体レーザをカップリングする。この第1クラッドはマルチモードであり、断面積も大きいので高出力の励起用半導体レーザ光の伝播が容易であり、マルチモード発振の半導体レーザを効率よくカップリングし、励起用光源を効率よく使用することができる。その第1クラッドの外周には第1クラッドの導波路を形成するための第2クラッドが形成されている。

【0068】また、上記の実施の形態の光ファイバー増幅器として石英ファイバー、又はシリケート系ファイバーを用いることができるが、これらの他にフッ化物系ファイバー、例えばZBLANファイバーを用いるようにしてもよい。このフッ化物系ファイバーでは、石英やシリケート系などに比べてエルビウム・ドープ濃度を大きくすることができ、これにより増幅に必要なファイバー長を短縮することができる。このフッ化物系ファイバーは、特に最終段の光ファイバー増幅器(図2の光ファイバー増幅器25)に適用することが望ましく、ファイバー長の短縮により、パルス光のファイバー伝播中の非線形効果による波長幅の広がりを抑えることができ、例えば露光装置に必要な波長幅が狭帯化された光源を得るこ

とが可能となる。特に開口数が大きい投影光学系を有する露光装置でこの狭帯光源が使用できることは、例えば投影光学系を設計、製造する上で有利である。

【0069】ところで、前述のように二重構造のクラッドを持つ光ファイバー増幅器の出力波長として、 $1.51 \sim 1.59 \mu\text{m}$ を使用する場合には、ドープするイオンとしてエルビウム(Er)に加えイットリウム(Yb)を共にドープすることが好ましい。これは半導体レーザによる励起効率を向上させる効果があるためである。すなわち、エルビウムとイットリウムとの両方をドープする場合、イットリウムの強い吸収波長が $915 \sim 975 \text{ nm}$ 付近に広がっており、この近傍の波長で各々異なる発振波長を持つ複数の半導体レーザを波長分割多重(WDM)により結合させて第1クラッドにカップリングすることで、その複数の半導体レーザを励起光として使用できるため大きな励起強度を実現することができる。

【0070】また、光ファイバー増幅器のドープ・ファイバーの設計については、本例のように予め定められた一定の波長で動作する装置(例えば露光装置)では、所望の波長における光ファイバー増幅器の利得が大きくなるように材質を選択することが望ましい。例えば、ArFエキシマレーザと同じ出力波長($193 \sim 194 \text{ nm}$)を得るための紫外レーザ装置において、光増幅器用ファイバーを用いる場合には所望の波長、例えば $1.548 \mu\text{m}$ で利得が大きくなる材質を選ぶことが望ましい。具体的には、ドープ元素のアルミニウムは、 $1.55 \mu\text{m}$ 付近のピークを長波長側にシフトさせ、リンは短波長側にシフトさせる効果を持つ。従って、 $1.547 \mu\text{m}$ 近傍で利得を大きくするためには、少量のリンをドープすればよい。同様に、例えばエルビウムとイットリウムとを共にドープ(コ・ドープ)したコアを持つ光増幅器用ファイバー(例えば前記ダブル・クラッド・タイプのファイバー)を用いる場合にも、コアに少量のリンを加えることにより、 $1.547 \mu\text{m}$ 付近でより高い利得を得ることができる。

【0071】次に、図1の実施の形態の紫外光発生装置における波長変換部20の構成例につき説明する。図3(a)は、2次高調波発生を繰り返して8倍波を得ることができる波長変換部20を示し、この図3(a)において、光ファイバー・バンドル19の出力端19aから出力された波長 $1.544 \mu\text{m}$ (周波数を ω とする)のレーザ光LB4の基本波は、1段目の非線形光学結晶502に入射し、ここでの2次高調波発生により基本波の2倍の周波数 2ω (波長は $1/2$ の 772 nm)の2倍波が発生する。この2倍波は、レンズ503を経て2段目の非線形光学結晶503に入射し、ここでも再び2次高調波発生により、入射波の2倍、即ち基本波に対し4倍の周波数 4ω (波長は $1/4$ の 386 nm)を持つ4倍波が発生する。発生した4倍波は更にレンズ506を

介して3段目の非線形光学結晶504に進み、ここで再び2次高調波発生によって、入射波の周波数 4ω の2倍、即ち基本波に対し8倍の周波数 8ω を有する8倍波(波長は $1/8$ の 193 nm)が発生する。この8倍波は紫外のレーザ光LB5として射出される。即ち、この構成例では、基本波(波長 $1.544 \mu\text{m}$)→2倍波(波長 772 nm)→4倍波(波長 386 nm)→8倍波(波長 193 nm)の順に波長変換が行われる。

【0072】また、射出されるレーザ光LB5の一部(例えば1%程度)がビームスプリッタ560を介して光電検出器561に入射し、光電検出器561の検出信号が不図示の制御装置に供給されている。その光電検出器561の検出信号より波長変換部20から射出される段階でのレーザ光LB5の強度が常時モニタできる。不図示であるが、以下の構成例においてもそれぞれモニタ用の光電検出器561が備えられている。

【0073】前記波長変換に使用する非線形光学結晶としては、例えば基本波から2倍波への変換を行う非線形光学結晶502にはLiB₃O₅(LBO)結晶を、2倍波から4倍波への変換を行う非線形光学結晶503にはLiB₃O₅(LBO)結晶を、4倍波から8倍波への変換を行う非線形光学結晶504にはSr₂Be₂B₂O₇(SBBO)結晶を使用する。ここで、LBO結晶を使用した基本波から2倍波への変換には、波長変換のための位相整合にLBO結晶の温度調節による整合方法(Non-Critical Phase Matching:NCPM)を使用する。NCPMは、非線形光学結晶内での基本波と第二高調波との間の角度ずれである「Walk-off」が起らないため、高効率で2倍波への変換を可能にし、また発生した2倍波はWalk-offによるビームの変形も受けないため有利である。

【0074】なお、図3(a)において、光ファイバー・バンドル19と非線形光学結晶502との間に、レーザ光LB4の入射効率を高めるために集光レンズを設けることが望ましい。この際に、光ファイバー・バンドル19を構成する各光ファイバーのモード径(コア径)は例えば $2.0 \mu\text{m}$ 程度であり、非線形光学結晶中で変換効率の高い領域の大きさは例えば $2.0 \mu\text{m}$ 程度であるため、各光ファイバー毎に1.0倍程度の倍率の微小レンズを設けて、各光ファイバーから射出されるレーザ光を非線形光学結晶502中に集光するようにしてもよい。これは以下の構成例でも同様である。

【0075】次に、図3(b)は2次高調波発生と和周波発生とを組み合わせて8倍波を得ることができる波長変換部20Aを示し、この図3(b)において、光ファイバー・バンドル19の出力端19bは、拡大して示すように多数(例えば128本)の光ファイバーを線状に束ねてある。これは変形照明を行う際に好適である。その出力端19bから射出された波長 $1.544 \mu\text{m}$ のレーザ光LB4の基本波は、LBO結晶よりなり上記の

NCPMで制御されている1段目の非線形光学結晶507に入射し、ここで2次高調波発生により2倍波が発生する。更に、非線形光学結晶507中を基本波の一部がそのまま透過する。この基本波及び2倍波は、共に直線偏光状態で波長板(例えば1/2波長板)508を透過して、基本波のみが偏光方向が90度回転した状態で射出される。この基本波と2倍波とはそれぞれレンズ509を通過して2段目の非線形光学結晶510に入射する。

【0076】非線形光学結晶510では、1段目の非線形光学結晶507で発生した2倍波と、変換されずに透過した基本波とから和周波発生により3倍波を得る。非線形光学結晶510としてはLBO結晶が用いられるが、1段目の非線形光学結晶507(LBO結晶)とは温度が異なるNCPMで用いられる。非線形光学結晶510で得られた3倍波と、波長変換されずに透過した2倍波とは、ダイクロイック・ミラー511により分離されて、ダイクロイック・ミラー511で反射された3倍波は、ミラーM1で反射されレンズ513を通過して3段目の β -BaB₂O₄(BBO)結晶よりなる非線形光学結晶514に入射する。ここで3倍波が2次高調波発生により6倍波に変換される。

【0077】一方、ダイクロイック・ミラーを透過した2倍波はレンズ512及びミラーM2を経てダイクロイック・ミラー516に入射し、非線形光学結晶514で得られた6倍波もレンズ515を経てダイクロイック・ミラー516に入射し、ここでその2倍波と6倍波とは同軸に合成されて4段目のBBO結晶よりなる非線形光学結晶517に入射する。非線形光学結晶517では、6倍波と2倍波とから和周波発生により8倍波(波長193nm)を得る。この8倍波は紫外のレーザー光LB5として射出される。なお、4段目の非線形光学結晶517として、BBO結晶の代わりにCsLiB₆O₁₀(CLBO)結晶を用いることも可能である。この波長変換部20Aでは、基本波(波長1544 μ m)→2倍波(波長772nm)→3倍波(波長515nm)→6倍波(波長257nm)→8倍波(波長193nm)の順に波長変換が行われている。

【0078】このように6倍波と2倍波との一方が分岐光路を通過して4段目の非線形光学結晶517に入射する構成では、6倍波と2倍波とをそれぞれ4段目の非線形光学結晶517に集光して入射させるレンズ515、512を互いに異なる光路に配置することができる。この場合、3段目の非線形光学結晶514で発生した6倍波はその断面形状がWalk-off現象により長円形になっているため、4段目の非線形光学結晶517で良好な変換効率を得るためには、その6倍波のビーム整形を行うことが望ましい。そこで本例のように、レンズ515、512を別々の光路に配置することにより、例えばレンズ515としてシリンドリカルレンズ対を用いること等が可

能となり、6倍波のビーム整形を容易に行うことができる。このため、4段目の非線形光学結晶(BBO結晶)517での2倍波との重なり部を増加させて、変換効率を高めることが可能である。

【0079】なお、2段目の非線形光学結晶510と4段目の非線形光学結晶517との間の構成は図3(b)に限られるものではなく、4段目の非線形光学結晶517に6倍波と2倍波とが同時に入射するように、6倍波と2倍波とでその光路長が等しくなれば、いかなる構成であってもよい。更に、例えば2段目の非線形光学結晶510と同一光軸上に3段目及び4段目の非線形光学結晶514、517を配置し、3段目の非線形光学結晶514で3倍波のみを2次高調波発生により6倍波に変換して、波長変換されない2倍波と共に4段目の非線形光学結晶517に入射させてもよく、これによりダイクロイック・ミラー511、516を用いる必要がなくなる。

【0080】また、図3(e)に示した波長変換部20について各チャネル当たりの8倍波(波長193nm)の平均出力を実験的に求めて見た。基本波の出力は前述の実施形態で説明した通り各チャネルの出力端で、ピーク・パワー20kW、パルス幅1ns、パルス繰り返し周波数100kHz、及び平均出力2Wである。この結果、各チャネル当たりの8倍波の平均出力は229mWであった。従って、全128チャネルを合わせたバンドルからの平均出力は29Wとなり、露光装置用光源として十分な出力の、波長193nmの紫外光を提供することができる。図3(b)の構成例でも実用的な出力が得られる。

【0081】なお、波長変換部20、20A以外の非線形光学結晶の組み合わせも可能である。これらの中から変換効率が高く、構成が簡素化できるものを使用することが望ましい。次に、F2レーザー(波長157nm)とほぼ同一の波長の紫外光を得るための波長変換部の構成例につき説明する。この場合には、図1(a)の単一波長発振レーザー11において発生する基本波の波長を157 μ mとして、波長変換部20として10倍波の発生を行う波長変換部を使用すればよい。

【0082】図4(a)は、2次高調波発生と和周波発生とを組み合わせると10倍波を得ることができる波長変換部20Bを示し、この図4(b)において、光ファイバー・バンドル19の出力端19cは、予め「Walk-off」の影響を軽減するためにシリンドリカルレンズ等を用いた場合に最終的に円形になるように楕円状に束ねてある。その出力端19cから射出された波長157 μ mのレーザー光LB4の基本波は、LBO結晶よりなる1段目の非線形光学結晶603に入射し、2次高調波発生により2倍波に変換される。この2倍波は、レンズ603を介してLBOよりなる第2の非線形光学結晶604に入射して、2次高調波発生による4倍波に変換され、

一部は2倍波のままで透過する。

【0083】非線形光学結晶604を透過した4倍波及び2倍波は、ダイクロイック・ミラー605に向かい、ダイクロイック・ミラー605で反射された4倍波は、ミラーM1で反射されレンズ608を通過して3段目のS r 2 B e 2 B 2 O 7 (S B B O) 結晶よりなる非線形光学結晶609に入射して、2次高調波発生により8倍波に変換される。一方、ダイクロイック・ミラーを透過した2倍波はレンズ606及びミラーM2を経てダイクロイック・ミラー607に入射し、非線形光学結晶609で得られた8倍波もレンズ610を経てダイクロイック・ミラー607に入射し、ここでその2倍波と8倍波とは同軸に合成されて4段目のS B B O 結晶よりなる非線形光学結晶611に入射し、ここで8倍波と2倍波とからの和周波発生により10倍波(波長157nm)が得られる。この10倍波は紫外のレーザー光LB5として射出される。即ち、波長変換部20Bでは、基本波(波長157μm)→2倍波(波長78.5nm)→4倍波(波長39.25nm)→8倍波(波長19.625nm)→10倍波(波長15.7nm)の順に波長変換が行われる。

【0084】この構成例においても、ダイクロイック・ミラー605、607を用いずに4つの非線形光学結晶602、604、609、611を同一光軸上に配置してもよい。但し、本例では2段目の非線形光学結晶604で発生した4倍波はその断面形状が「Walk-off」現象により長円形になっている。このため、このビームを入力とする4段目の非線形光学結晶611で良好な変換効率を得るためには、入射ビームとなる4倍波のビーム形状を整形し、2倍波との重なり部を広くすることが望ましい。本例では、集光用のレンズ606、608を別々の光路に配置することができるので、例えばレンズ608としてシリンドリカルレンズを用いることによって、4倍波のビーム整形を容易に行うことができる。このため、変換効率を高めることが可能である。この場合でも、入射光が楕円状であるため、最終的に断面が円形のレーザー光LB5が射出される。

【0085】また、F2レーザー(波長157nm)とほぼ同一波長の紫外光を得るためには、図1(a)の単一波長発振レーザー11において発生する基本波の波長を1099μmとして、波長変換部20として7倍波の発生を行う波長変換部を使用する方法も考えられる。図4(b)は、2次高調波発生と和周波発生とを組み合わせて7倍波を得ることができる波長変換部20Cを示し、この図4(b)において、光ファイバー・バンドル19の出力端19dは、楕円状の輪帯状に束ねてある。出力端19dから射出された波長1099μmのレーザー光LB4(基本波)は、LB0結晶よりなる1段目の非線形光学結晶702に入射し、ここでの2次高調波発生により2倍波が発生し、基本波の一部はそのまま透過

する。この基本波及び2倍波は、共に直線偏光状態で波長板(例えば1/2波長板)703を透過して、基本波のみの偏光方向が90度回転する。基本波及び2倍波はレンズ704を介してLB0結晶よりなる第2の非線形光学結晶705に入射し、ここでの和周波発生により3倍波が発生すると共に、2倍波の一部がそのまま透過する。

【0086】非線形光学結晶705から発生される2倍波と3倍波とはダイクロイック・ミラー706で分岐され、ここを透過した3倍波はレンズ707及びミラーM2を経てダイクロイック・ミラー708に入射する。一方、ダイクロイック・ミラー706で反射された2倍波は、ミラーM1及びレンズ709を通過してS B B O 結晶よりなる第3の非線形光学結晶710に入射し、2次高調波発生により4倍波に変換される。この4倍波は、レンズ711を経てダイクロイック・ミラー708に入射し、ダイクロイック・ミラー708で同軸に合成された3倍波及び4倍波は、S B B O 結晶よりなる第4の非線形光学結晶712に入射し、ここでの和周波発生により7倍波(波長157nm)に変換される。この7倍波は紫外のレーザー光LB5として射出される。即ち、この構成例では、基本波(波長1099μm)→2倍波(波長549.5nm)→3倍波(波長366.3nm)→4倍波(波長274.8nm)→7倍波(波長157nm)の順に波長変換される。

【0087】この構成例においても、ダイクロイック・ミラー706、708を用いずに4つの非線形光学結晶702、705、710、712を同一光軸上に配置してもよい。また、この例でも、3段目の非線形光学結晶710で発生した4倍波はその断面形状がWalk-off現象により長円形になっている。このため、このビームを入力とする4段目の非線形光学結晶712で良好な変換効率を得るためには、レンズ711としてシリンドリカルレンズを用いることによって、3倍波と4倍波との重なり部を最大にすればよい。この場合でも、出力端19dが楕円状の輪帯状であるため、出力されるレーザー光LB5の断面形状はほぼ完全な楕円状である。

【0088】なお、上記の実施の形態では、図1(a)より分かるようにm組のn個の光増幅ユニット18-1~18-nの出力の合成光を一つの波長変換部20で波長変換している。しかしながら、その代わりに、例えばm'個(m'は2以上の整数)の波長変換部を用意し、m組の光増幅ユニット18-1~18-nの出力をn'個ずつm'個のグループに分けて、各グループ毎に1つの波長変換部で波長変換を行い、得られたm'個(本例では例えばm'=4又は5等)の紫外光を合成するようにしてもよい。なお、m'個のグループの各々での出力(光増幅ユニット18)の数n'は任意でよく、更にm'個のグループ間でその出力の数n'を異ならせてもよい。

【0089】更に、図5及び図11に示すように $m' = 3$ とする、即ち3つの波長変換部20、137、139を設け、かつ $m \cdot n$ 本の光ファイバーを3つのバンドルに分けて束ね、バンドル毎にその対応する波長変換部で波長変換を行うようにしてもよい。この場合、紫外光を合成するのではなく、各紫外光を異なる用途に用いることになり、例えば光ファイバー増幅器の励起光源のオン・オフによって任意の波長変換部のみから紫外光を発生することが可能となる。

【0090】また、図3、図4に示した波長変換部の構成は一例に過ぎず、図11に示した光源装置が適用される製品（投影露光装置など）で要求される紫外光の波長や強度などに応じてその構成を決定すればよい。また、光ファイバー・バンドル19の出力端の形状は、波長変換部の構成に依らず任意でよく、その光源装置が適用される製品及びその用途などに応じてその出力端の形状を決定すればよい。例えば変形照明（輪帯照明、及び複数の偏心した光源を用いるいわゆる変形光源など）が通常照明よりも多く使われる投影露光装置では、光ファイバー・バンドル19の出力端を輪帯状とし、その逆の通常照明が多く使われる投影露光装置ではその出力端を円形状、楕円状、又は矩形状とすればよい。

【0091】上記の実施の形態の光源装置によれば、図1(a)の光ファイバー・バンドル19の出力端の直径が全チャネルを合わせても2mm程度以下であるため、1個、又は数個の波長変換部20ですべてのチャネルの波長変換を行うことが可能である。しかも、出力端が柔軟な光ファイバーを使用しているため、波長変換部、単一波長発振レーザ、及びスプリッタ等の構成部を分けて配置することが可能となるなど、配置の自由度が極めて高い。従って、本例の光源装置によれば、安価でコンパクト、かつ単一波長でありながら空間的コヒーレンスの低い紫外レーザ装置が提供できる。

【0092】次に、図5は、図1の光源装置を露光光源として備えた本例のステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置を示し、この図5において、露光光源101は、波長1:544nm（又は1:57nm）のレーザ光を基本波として発生する基本波発生部100と、その基本波を伝播する可撓性を有する光ファイバー・バンドル19と、この光ファイバー・バンドル19から射出された基本波の例えば8倍波（又は10倍波）よりなる波長が193nm（又は157nm）の真空紫外域の光を露光光1Lとして発生する波長変換部20とから構成されている。その基本波発生部100は、図1(a)の単一波長発振レーザ11から光分岐増幅部4中の光増幅ユニット18-1〜18-nまでの部材を表している。また、波長が193nm又は157nmの光はそれぞれArFエキシマレーザ又はF2レーザの代わりに使用できるために都合が良い。更に、本例では光ファイバー・バンドル19の先端部は複数本の長く可撓性のある光フ

アイバー・バンドル136、138に分かれ、光ファイバー・バンドル136、138の射出面にそれぞれ波長変換部20と同じ機能を有する小型の波長変換部137、139が配置され、波長変換部137、139からも露光光1Lと同じ波長の光が射出できるように構成されている。

【0093】露光光源101から射出される露光光1Lの発光タイミング、発光周波数、及びパルスエネルギーは露光量制御系109によって制御されており、露光量制御系109の動作は装置全体の動作を統括制御する主制御系105によって制御されている。露光光源101から射出される波長193nm（又は157nm）のパルス紫外光よりなる露光光1Lは、光路折り曲げ用のミラー102で反射された後、第1レンズ103A及び第2レンズ103Bよりなるリレーレンズ系を経て、光路折り曲げ用のミラー104を介してオブティカル・インテグレータ（又はホモジナイザー）としてのフライアイレンズ110に入射する。本例の波長変換部20から出力される露光光1Lは、所定の広がり角を持つ多数の光束の集合体であるため、リレーレンズ系（103A、103B）は、例えば光ファイバー・バンドル19の出力端、ひいては波長変換部20中の最終段の非線形光学結晶の中央部の面とフライアイレンズ110の入射面とを共役にすると共に、入射時の広がり角を最適化する。これによって、露光光1Lの利用効率が高く維持される。

【0094】また、レンズ103A、103Bの間に回折光学素子（Diffractive Optical Element: DOE）よりなる平坦化部材106が、スライダ107によって挿脱自在に配置されている。平坦化部材106は、微小な位相型の回折格子の多数の集合体であり、これによって輪帯状の照度分布の光束のフライアイレンズ110の入射面上での照度分布を円形の分布に変換する。本例の投影露光装置が、変形照明を主に行う装置である場合には、露光光源101中の光ファイバー・バンドル19の出力端を図3(b)の輪帯状の出力端19b、又は図4(b)の楕円の輪帯状の出力端19dにする。この構成で、通常照明を行う際に平坦化部材106を露光光1Lの光路上に配置する。これによって、変形照明（後述の開口絞り板111の開口B又はCを使用する照明）を行う場合に高い照度を得ることができると共に、通常照明（開口A又はDを使用する照明）を行う場合にも少ない光量損失（例えば10%程度）で露光を行うことができる。

【0095】一方、本例の投影露光装置が通常照明を主に行う装置である場合には、露光光源101中の光ファイバー・バンドル19の出力端を図3(a)の内形の出力端19a、又は図4(a)の楕円状の出力端19cにする。この構成で、変形照明を行う際には、例えば平坦化部材106の代わりに輪帯状の照度分布を得ることができる回折光学素子（DOE）を露光光1Lの光路上に

設置してもよい。

【0096】次に、フライアイレンズ110の射出面には、照明系の開口絞り板111が回転自在に配置され、開口絞り板111の回転軸の周りには、通常照明用の円形の開口絞りA、複数の偏心した小開口よりなる変形光源用の開口絞りB、輪帯照明用の開口絞りC、及び小さい円形開口よりなる小さいコヒーレンスファクタ(α 値)用の開口絞りDが形成されている。そして、主制御系105の制御のもとで、開口絞り板111を駆動モータEで回転することによって、フライアイレンズ110の射出面に選択された照明条件に応じた照明系開口絞りを配置できるように構成されている。

【0097】フライアイレンズ110の射出面の開口絞りを通過した露光光11の一部は、ビームスプリッタ113にて反射された後、集光レンズ114を介して光電検出器よりなるインテグレートセンサ115に入射する。インテグレートセンサ115の検出信号は露光量制御系109に供給され、露光量制御系109中で例えば各パルス光毎にピークホールド回路及びアナログ／デジタル(A/D)変換器を介してデジタルデータに変換される。本例では、予めインテグレートセンサ115の検出信号のデジタルデータから被露光基板としてのウエハ上での露光光の単位面積当たりのパルスエネルギーを算出するための係数(相関係数) α を求めておく。この係数 α を露光量制御系109内に記憶しておく。そして、露光時にはインテグレートセンサ115の検出信号に係数 α を乗算することで、ウエハ上でのパルスエネルギーを間接的にモニタする。

【0098】ビームスプリッタ113を通過した露光光11は、第1リレーレンズ116Aを経て順次固定視野絞り(レチクルブラインド)117、及び可動視野絞り118を通過する。固定視野絞り117は、レチクルR上の矩形的照明領域の形状を規定する視野絞りであり、可動視野絞り118は、走査露光の開始時及び終了時に不要な部分への露光が行われないように照明領域を開じるために使用される。可動視野絞り118は、レチクルRのパターン面との共役面上に配置され、固定視野絞り117はその共役面に対して所定間隔だけデフォーカスした位置に配置されている。

【0099】可動視野絞り118を通過した露光光11は、第2リレーレンズ116B、光路折り曲げ用のミラー119、及びコンデンサレンズ120を経て、レチクルRのパターン面(下面)に設けられたパターン領域131内の細長い矩形的照明領域I Rを照明する。露光光11のもとで、レチクルRの照明領域I R内のパターンは、両側(又はウエハ側に片側)テレセントリックな投影光学系P Lを介して、所定の投影倍率MRW(本例ではMRWは $1/4$ 、 $1/5$ 、 $1/6$ 等)でフォトレジストが塗布されたウエハW上の矩形的露光領域I Wに縮小投影される。レチクルR及びウエハWがそれぞれ本発明の第

1物体及び第2物体に対応する。ウエハ(wafer)Wは例えば半導体(シリコン等)又はSOI(silicon on insulator)等の円板状の基板である。以下、投影光学系P Lの光軸AXに平行にZ軸を取り、Z軸に垂直な平面内で走査露光時のレチクルR及びウエハWの走査方向に沿ってY軸を取り、走査方向SDに垂直な非走査方向に沿ってX軸を取って説明する。この場合、照明領域I R及び露光領域I Wは、それぞれ走査方向に直交する非走査方向(X方向)に細長いスリット状の領域である。

【0100】また、レチクルRはレチクルステージ122上に吸着保持され、レチクルステージ122はレチクルベース123上にリニアモータによってY方向に連続移動できるように載置されている。更に、レチクルステージ122には、レチクルRをX方向、Y方向、回転方向に微動する機構も組み込まれている。不図示のレーザ干渉計によってレチクルステージ122の位置及び回転角が計測され、この計測値及び主制御系105からの制御情報に基づいて、レチクルステージ122の動作が制御される。

【0101】一方、ウエハWはウエハホルダ124上に吸着保持され、ウエハホルダ124はウエハWのフォーカス位置(Z方向の位置)及び傾斜角を制御するZチルトステージ125上に固定され、Zチルトステージ125はXYステージ126上に固定され、XYステージ126は例えばリニアモータ方式によって、ウエハベース127上でZチルトステージ125(ウエハW)をY方向に連続移動させると共に、X方向及びY方向にステップ移動させる。Zチルトステージ125、XYステージ126、及びウエハベース127よりウエハステージ128が構成されている。不図示のレーザ干渉計によってZチルトステージ125の位置及び回転角が計測され、この計測値及び主制御系105からの制御情報に基づいて、ウエハステージ128の動作が制御される。

【0102】走査露光時には、照明領域I Rに露光光11を照射して、レチクルステージ122を介してレチクルRを照明領域I Rに対して+Y方向(又は-Y方向)に速度V Rで走査すると同期して、XYステージ126を介してウエハWを露光領域I Wに対して-Y方向(又は+Y方向)に速度MRW・V R(MRWはレチクルRからウエハWへの投影倍率)で走査することによって、レチクルRのパターン領域131内のパターン像がウエハW上の1つのショット領域142に逐次転写される。レチクルRとウエハWとの走査方向が逆であるのは、投影光学系P Lが反転投影を行うからであり、投影光学系P Lが正立像を投影する場合には、レチクルRとウエハWとの走査方向は同一(+Y方向又は-Y方向)となる。その後、XYステージ126をステップングさせてウエハW上の次のショット領域を走査開始位置に移動した後、同期走査を行うという動作がステップ・アンド・スキャン方式で繰り返されて、ウエハW上の各ショット

領域への露光が行われる。その後ウエハW上のフォトレジストの現像、及びエッチングやイオン注入等のパターン形成を行うことによって、当該レイヤの回路パターンが形成される。

【0103】このような露光を行うに際しては予めレチクルRとウエハWとのアライメントを行っておく必要がある。そのため、レチクルRにはアライメントマークRMA及びRMBが形成され、アライメントマークRMA及びRMBの上方にミラー135等を介して撮像方式で、TTR（スルー・ザ・レチクル）方式のアライメント顕微鏡133及び134が配置され、アライメント顕微鏡133の露光光Lと同じ波長の照明光は、光ファイバー・バンドル136の射出部に配置された波長変換部137から供給され、その照明光の一部がアライメント顕微鏡134にも供給されている。アライメント顕微鏡133、134の撮像信号は主制御系105に供給されている。

【0104】また、投影光学系PLの側面に例えば可視域の白色光を用いて撮像方式でアライメントマークの位置を検出するオフ・アクシス方式のアライメントセンサ136が固定され、このアライメントセンサ136の撮像信号も主制御系105に供給されている。そして、試料台としてのZチルトステージ125上にはレチクルR側のマークに対応した基準マーク143A、143B、及びアライメントセンサ136用の基準マーク144が形成された基準マーク部材130が固定されている。この基準マーク部材130上の基準マーク143A～143Cをアライメント顕微鏡133、134及びアライメントセンサ136で観察することによって、アライメントセンサ136のベースライン量（露光中心と検出中心との間隔）が求められ、このベースライン量を用いてウエハW上の各ショット領域のアライメントが高精度に行われる。

【0105】また、Zチルトステージ125上にスリット状の開口140及びほぼ正方形の開口141が形成された透過性の基板129が固定され、その開口140の底面側に光ファイバー・バンドル138及び波長変換部139から射出される露光光と同じ波長の照明光が導かれている。図6（a）は、基板129の底部のZチルトステージ125の構成を示し、この図6（a）において、光ファイバー・バンドル138の先端部に固定された波長変換部139の出力端がZチルトステージ125内に設置され、結像特性の計測時に波長変換部139から射出された露光光と同じ波長の照明光は、集光レンズ151、及びミラー152を経てスリット状の開口140を底面側から照明する。ミラー152と基板129との間にビームスプリッタBS1が配置されている。そして、開口140を通過した照明光は、投影光学系PLを経てレチクルRの下面（パターン面）に一度その開口140の像を形成し、レチクルRの下面からの反射光は、

投影光学系PLを経て再び開口140上にその開口140の像を形成する。投影光学系PL側から開口140を通過した照明光は、ビームスプリッタBS1、集光レンズ153を経て光電検出器154で受光され、光電検出器154の検出信号SZがサンプル／ホールド回路及びアナログ／デジタル（A/D）変換器を介して図5の主制御系105に供給される。

【0106】この際に、基板129の上面は図5のウエハWの表面と同じ高さに設定されており、基板129の上面が投影光学系PLのベストフォーカス位置からZ方向にずれると、開口140を介して戻る光量が低下して、図6（b）に示すように検出信号SZが低下することから、Zチルトステージ125をZ方向に所定のステップ量ずつ移動させながら検出信号SZを取り込み、その検出信号SZが最大になるときのZ方向の位置（フォーカス位置）を求めると、それがベストフォーカス位置BFとなる。例えば投影露光装置を収納するチャンバの外部の大気圧、及び投影光学系PLの周囲の温度や湿度が変動したり、露光光の照射エネルギーが変動したりすると、そのベストフォーカス位置BFが変動するため、定期的にその開口140を用いてベストフォーカス位置BFのキャリブレーションを行うことが望ましい。

【0107】図5に戻り、基板129の正方形の開口141の底面側には広い受光面積の第2の光電検出器が配置され、この光電検出器の検出信号も主制御系105に供給されている。そして結像特性の評価時には、レチクルRの代わりに、図7（a）に示すように、多数の評価用マーク155が形成されたテストレチクルR1をレチクルステージ122上に載置する。評価用マーク155は、X軸のマークRMX及びY軸のマークRMYより構成されている。この状態で、テストレチクルR1の計測対象の評価用マークを照明領域LR内に移動して、露光光Lを照射して、図7（b）に示すようにその評価用マーク（X軸のマークRMXとする）の像RMXPを開口141でX方向に走査して、その第2の光電検出器の検出信号SXを取り込む。

【0108】図7（c）はその検出信号SXを示し、この図7（c）において、検出信号SXは走査方向の位置Xに関して階段状に変化するため、例えばその検出信号SXを位置Xに関して微分した信号に基づいて、その評価用マークの像RMXPの各マーク部のエッジ部の座標X1、X2、X3を求めることができ、この値を例えば平均化することでその像RMXPのX座標が高精度に求められる。同様に、Y軸のマークの像のY座標も求められるため、求められた座標を設計上の座標と比較することによって、投影光学系PLのディストーションや倍率誤差、更にはレチクルR1の描画誤差等を計測することができる。

【0109】これらの計測の際に、露光光源がエキシマレーザ光源（例えばArFエキシマレーザ光源）である

ときには、その露光光は図8(a)の露光光1Lで示すように、ピークパルスPE2で周波数が2kHz程度となる。これに対して本例の露光光1Lは図8(b)に示すようにピークレベルがPE1で周波数が1.00kHz程度であり、更に、周波数1.00kHzの各パルス部PP1, PP2, ...は、実際には図6(c)に示すように多数(例えば128個)の3ns程度の間隔のパルスの集合である。従って、ウエハ上で同じ照度を得るためには、ピークレベルPE1はピークレベルPE2に比べて $1/1.0000 \sim 1/1.0000$ 程度でよいことになる。更に、エキシマレーザ光を使用した場合には、パルス発光毎に、図6(b)の検出信号SZ及びSXの規格化を行っていたが、本例では周波数が高いためにパルス毎の演算は得策ではない。

【0110】そこで、本例では、図8(b)の1.00kHz程度のパルス露光光1Lのインテグレータセンサ115による検出信号をnパルス(nは例えば10程度の整数)毎に積算する。同様に、図6の検出信号SZ、又は図7の検出信号SXもそれぞれnパルス毎に積算(又は平均化)し、積算(又は平均化)後の信号をそれぞれ検出信号SZ1, SZ2, ... (又はSX1, SX2, ...)とする。そして、インテグレータセンサ115によるnパルス毎の積算エネルギーを $\Sigma E1, \Sigma E2, \dots$ とすると、積算エネルギー $\Sigma E1, \Sigma E2, \dots$ も頂次露光量制御系109から主制御系105に供給され、主制御系105は、検出信号SZ1, SZ2, ... (又はSX1, SX2, ...)をそれぞれ積算エネルギー $\Sigma E1, \Sigma E2, \dots$ で除算して規格化し、規格化後の検出信号に基づいて図6(b)のベストフォーカス位置BF、又は図7(c)の評価用マークの像の位置を求める。

【0111】これによって、露光光源101からの露光光1L、及び計測用の照明光のパルス周波数が高い場合でも、演算系の負担を重くすることなく、高精度に結像特性を計測することができる。このような計測の結果、ベストフォーカス位置の変動、又はディストーションの変動等が計測された場合に、本例では、図1(a)の単一波長発振レーザ11からのレーザ光LB1の波長をシフトさせることによって、ほぼリアルタイムでその結像特性の変動量を相殺するようにする。これによって、露光工程のスループットが高く維持される。

【0112】なお、なお、そのように複数パルス数毎に検出信号を積算する代わりに、例えば複数パルス分程度の発光が行われる時間を $\Delta T P n$ として、頂次 $\Delta T P n$ の時間ずつパルス露光光1Lの積算エネルギーを求めるようにしてもよい。また、環境センサの出力(気圧、温度、湿度など)と照明光の入射による投影光学系の熱蓄積量に関する情報とに基づいて、結像特性の変動量を計算する、あるいは計測と計算とを併用して、波長をシフトさせるようにしてもよい。

【0113】また、本例では図3(a)の波長変換部2

0の射出部の光電検出器561の検出信号、及び図5のインテグレータセンサ115の検出信号が並列に主制御系105にも取り込まれている。主制御系105は、それら2つの信号のレベルを比較して、例えば光電検出器561の検出信号のレベルが低下したときには、波長変換部20内で曇りが生じている恐れがあるというアラームを発生し、逆にインテグレータセンサ115の検出信号のレベルが低下したときには、波長変換部20からビームスプリッタ113までの光学部材に曇りが生じている恐れがあるというアラームを発生する。これによって、曇り物質の生じている部材を速く検出できるため、メンテナンスを容易に行うことができる。

【0114】次に、本発明の第2の実施の形態につき図9を参照して説明する。本例は投影光学系PLの検査装置に本発明を適用したものである。図9は本例の検査装置を示し、この図9において、ウエハステージ128上に上部が開口となって側面からの光が遮光される容器158が固定され、容器158内に集光レンズ159、開口板160、及びCCD型等の2次元の撮像素子161が固定され、撮像素子161の撮像信号が制御装置162に供給されている。また、容器158上に検査対象の投影光学系PLが配置され、その上に評価用パターン156が形成されたテストレチクル156が配置されている。

【0115】そして、図5の光ファイバ・バンドル136及び波長変換部137と同じ照明系から射出された露光光1Lが、集光レンズ157及びミラーM10を介してテストレチクル156を透射照明している。この状態で、ウエハステージ128内のZ軸方向にステージ125をX方向に走査して、図10に示すように撮像素子161で検出される集光点の位置の変動量WDを求めることによって、投影光学系PLの波面収差を計測することができる。この際に、光ファイバ・バンドル136及び波長変換部137は小型であるため、計測システムをコンパクトに構成できる。

【0116】ところで、図9の検査装置で計測された波面収差に基づいて投影光学系PLの結像特性が計測された後、投影光学系PLは投影露光装置内の架台に固定されて、試し焼きや図6又は図7の空間像計測などを経て投影光学系PLの結像特性が最終調整されることになる。なお、検査装置の構成は図9に限られるものではなく任意でよく、検査対象も投影光学系に限られず、任意の光学系で良い。また、図9の検査装置では露光用照明光と同一波長を検査光として用いているが、例えば検査対象となる光学系が反射光学系のみから構成されている場合、その光学系の設計波長(本例では露光波長に相当)と検査光との波長が異なってもよいことがある。

【0117】次に、本発明の第3の実施の形態につき図11を参照して説明する。本例は、露光光源としてエキシマレーザ光源(又はF2レーザ光源)と上記の実施の

形態の光ファイバー増幅型の光源とを併用するものであり、図11において図5に対応する部分には同一符号を付してその詳細説明を省略する。図11は、本例のステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置を示し、この図11において、第1の露光光源としてのA r Fエキシマレーザ光源101 Aからパルス発光される波長193 nmの露光光11 Eは、ミラー102 Aで上方に折り曲げられてミラー104に至る。通常の露光時にはこの露光光11 Eが露光光11としてレジクルRを照明する。ミラー104以降の構成は図5の実施の形態と同様である。

【0118】また、露光光11 Eの光路に挿脱自在にミラー102が配置され、ミラー102の近傍に光ファイバー増幅型の露光光源101が配置されている。また、ミラー102 Aとミラー104との間にレンズ103 A、103 Bが挿脱材に配置されている。本例では、例えばメンテナンス時にA r Fエキシマレーザ光源101 Aの発光を停止して、ミラー102、及びレンズ103 A、103 Bを光路に配置して、露光光源101からの照明光11 Eをミラー104側に導くようにする。このようなメンテナンス時には、露光光の光路は工場内部と同様の空気の雰囲気中を通るため、A r Fエキシマレーザ光源101を使用すると光学部材に曇り物質が生じる恐れがある。しかしながら、本例では光ファイバー増幅型の露光光源101からのピークレベルが格段に小さい露光光11 Eを用いているため、曇り物質が生じる恐れは殆どないという利点がある。

【0119】なお、露光光源101は例えば可動として、必要な位置に容易に移動できるようにしておくことが望ましい。なお、本発明は、ステップ・アンド・スキャン方式のような走査露光型の投影露光装置のみならず、一括露光型（ステッパ等）の投影露光装置やプロキシミティ方式の露光装置等にも適用できることは明らかである。

【0120】また、上記の実施の形態の投影露光装置は、照明光学系や投影光学系の調整を行うと共に、各構成要素を、電氣的、機械的又は光学的に連結して組み上げられる。これらの場合の作業は温度管理が行われたクリーンルーム内で行うことが望ましい。そして、上記のように露光が行われたウエハWが、現像工程、パターン形成工程、ボンディング工程、パッケージング等を経ることによって、半導体素子等のデバイスが製造される。更に、本発明は液晶表示素子やプラズマディスプレイ素子等の表示素子、又は薄膜磁気ディスク等のデバイスを製造する際にも適用することができる。また、投影露光装置用のフォトマスクを製造する際にも本発明を適用することができる。

【0121】なお、本発明は上述の実施の形態に限定されることがなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の構成を取り得ることは勿論である。

【0122】

【発明の効果】本発明によれば、光ファイバー増幅型の光源を使用することによって、露光装置を小型化できてメンテナンスが容易にできると共に、露光光の露光周波数を高くしたときに結像特性の計測精度を向上できる利点がある。また、複数の光ファイバー増幅器からのレーザ光を共通の波長変換部で波長変換する場合には、小型化できて空間的コヒーレンスを低減できると共に、全体としての発振スペクトル線幅を簡単な構成で狭くできる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の実施の形態の光源装置を示す図である。

【図2】 図1中の光増幅ユニット18-1～18-nの構成例を示す図である。

【図3】 図1中の波長変換部20の構成例を示す図である。

【図4】 図1中の波長変換部20の他の構成例を示す図である。

【図5】 本発明の第1の実施の形態の投影露光装置を示す斜視図である。

【図6】 (a)は図5の基板129の底部の計測系の構成を示す拡大断面図、(b)はその計測系の検出信号の一例を示す図である。

【図7】 図5の開口141を用いる計測方法の説明図である。

【図8】 本発明の実施の形態の露光光と従来の露光光とを対比させて示す図である。

【図9】 本発明の第2の実施の形態の計測システムを示す一部を切り欠いた構成図である。

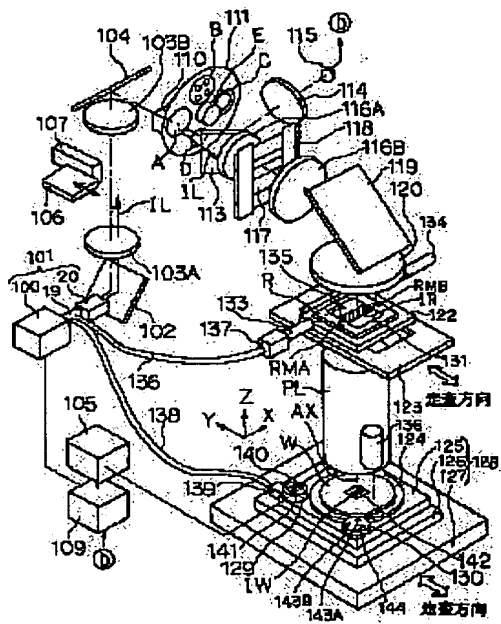
【図10】 図9の実施の形態の計測結果の一例を示す図である。

【図11】 本発明の第3の実施の形態の投影露光装置を示す斜視図である。

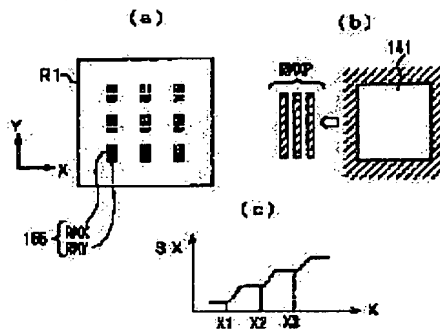
【符号の説明】

11…単一波長発振レーザ、12…光変調素子、13…光ファイバー増幅器、14…スプリッタ、15-1～15-n、17-1～17-n…光ファイバー（遅延素子）、16-1～16-n…スプリッタ、18-1～18-n…光増幅ユニット、19…光ファイバー・バンドル、20…波長変換部、22、25…光ファイバー増幅器、101…露光光源、101 A…A r Fエキシマレーザ光源、R…レジクル、P L…投影光学系、W…ウエハ

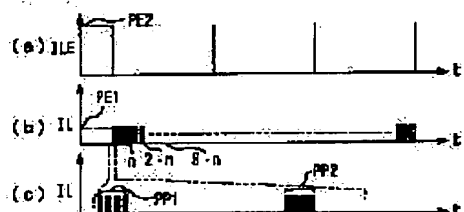
【図5】



【図7】



【図8】



【図9】

